Rotverschiebung

Dieser Artikel wurde in die Qualitätssicherung der Redaktion Physik eingetragen. Wenn du dich mit dem Thema auskennst, bist du herzlich eingeladen, dich an der Prüfung und möglichen Verbesserung des Artikels zu beteiligen. Der Meinungsaustausch darüber findet derzeit **nicht** auf der Artikeldiskussionsseite, sondern auf der **Qualitätssicherungs-Seite** der Physik statt.

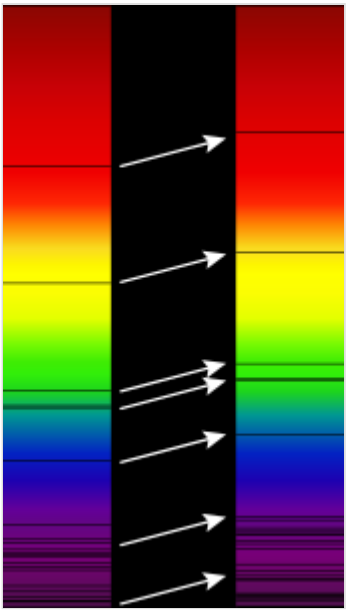


Illustration der Rotverschiebung der Spektrallinien für einen weit entfernten Supergalaxienhaufen rechts im Vergleich zur Sonne links

Die **Rotverschiebung** ist in der Astronomie und Kosmologie die Lageveränderung des Spektrums und insbesondere identifizierter Spektrallinien im Emissions- und Absorptionsspektrum astronomischer Objekte in Richtung der größeren Wellenlängen. Die Rotverschiebung ist definiert als Verhältnis der Wellenlängenänderung zur ursprünglichen Wellenlänge:

$$z := \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}}}{\lambda_0} - 1$$

Der Name bezieht sich auf das rote Licht am langwelligen Ende des sichtbaren Spektrums. Bei Infrarot-Emission verschieben sich die Spektrallinien entsprechend in die Richtung der noch längerwelligen Terahertzstrahlung. Eine Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen wird als **Blauverschiebung** bezeichnet.

Festgestellt wird die Rotverschiebung durch den Vergleich bekannter Atom- und Molekülspektren mit den mittels Spektroskopie gemessenen Werten, d. h. nach Analyse der Spektrallinien der Emissionen oder Absorptionen im Sternenlicht, beispielsweise des Wasserstoffs.

Inhaltsverzeichnis

Ursachen

Rot- und Blauverschiebung durch relative Bewegung

Gravitative Rot- und Blauverschiebung

- Gravitative Rot- und Blauverschiebung in der speziellen Relativitätstheorie

Kosmologische Rotverschiebung

- Rotverschiebung, Blauverschiebung und Kosmologie
- Relativistische Herleitung

Messmethoden

Siehe auch

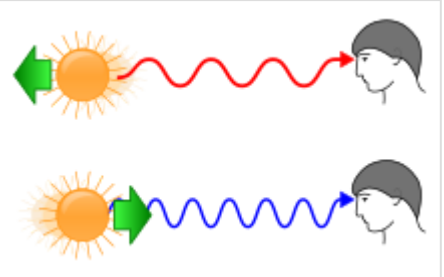
Literatur
Weblinks
Einzelnachweise

Ursachen

Ursachen der Rotverschiebung können sein:

1. Eine Relativbewegung von Quelle und Beobachter (Doppler-Effekt)
2. Unterschiedliche Gravitationspotentiale von Quelle und Beobachter (Relativität)
3. Das expandierende Universum zwischen Quelle und Beobachter (Kosmologie)

Rot- und Blauverschiebung durch relative Bewegung



Bewegung einer Lichtquelle relativ zum Beobachter

Rot- und Blauverschiebung sind Begriffe aus der Spektroskopie, bei der man Spektrallinien von Atomkernen, Atomen und Molekülen untersucht. Diese können in Absorption oder Emission auftreten, je nachdem, ob Energie aufgenommen oder abgegeben wird. Die Energie wird durch elektromagnetische Strahlung in Form von Photonen ausgetauscht, ist also gequantelt. Wo sich die Spektrallinien im Spektrum befinden, hängt nicht nur von den Einzelheiten des Quantenübergangs ab, sondern auch vom Bewegungszustand der Strahlungsquelle relativ zum Beobachter (Dopplereffekt) und von der Krümmung der Raumzeit.

Befindet man sich im Ruhesystem des Emitters (Relativgeschwindigkeit null zwischen Emitter und Beobachter), so misst man die Spektrallinie bei ihrer Ruhewellenlänge. Nun kann aber auch eine Relativbewegung zwischen Strahlungsquelle und Detektor vorliegen. Wesentlich ist nur diejenige Geschwindigkeitskomponente, die in Richtung des Detektors zeigt. Diese Komponente heißt Radialgeschwindigkeit. Ihr Betrag ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Emitter und Beobachter. Elektromagnetische Strahlung bewegt sich sowohl bei der Emission als auch bei der Absorption mit der Lichtgeschwindigkeit, gleichgültig wie schnell sich Quelle und Ziel relativ zueinander bewegen.

Bewegt sich die Strahlungsquelle vom Beobachter weg, so wird die Spektrallinie zu größeren, roten Wellenlängen hin verschoben. Die Welle wird gewissermaßen auseinandergezogen. Dies nennt man Rotverschiebung. Bewegt sich die Strahlungsquelle auf den Beobachter zu, so wird die Spektrallinie zu kleineren Wellenlängen hin verschoben. Dies ist gerade die Blauverschiebung, weil die Linie zum blauen Teil des Spektrums verschoben wird. Anschaulich kann man sich vorstellen, wie die elektromagnetische Welle gestaucht wird.

Die ganze atomare und molekulare Welt ist aufgrund der Thermodynamik in Bewegung. Bei endlicher Temperatur bewegen sich diese Strahler geringfügig um eine Ruhelage. Spektrallinien haben deshalb eine natürliche Breite aufgrund atomarer Bewegung und Molekularbewegung, weil sie sich relativ zum Detektor immer ein wenig vor und zurück bewegen. Dieses Phänomen nennen Physiker thermische Dopplerverbreiterung. Die Ruhewellenlänge ist also nicht beliebig scharf. Das kann sie auch aufgrund der Heisenbergschen Unschärfe der Quantentheorie nicht sein.

Die spezielle Relativitätstheorie gibt für den Zusammenhang zwischen Radialgeschwindigkeit v und Dopplerverschiebung z den folgenden Zusammenhang (mit der Lichtgeschwindigkeit c):

$$z = \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}} - 1$$

und umgekehrt

$$\frac{v}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$

Bei niedrigen Geschwindigkeiten ($v/c \ll 1$) kann dieser Zusammenhang durch $z \approx v/c$ genähert werden.

Gravitative Rot- und Blauverschiebung

Siehe auch: Tests der allgemeinen Relativitätstheorie

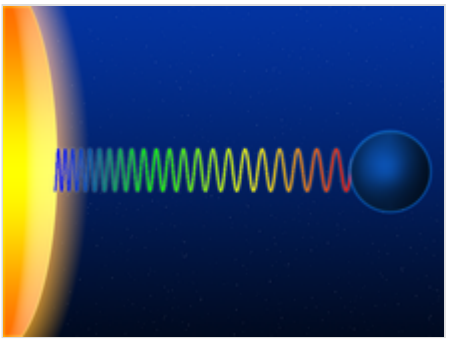
Die **gravitative Rotverschiebung** oder **Gravitations-Rotverschiebung** im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie ist eine Wellenlängenvergrößerung für abgestrahltes Licht, also für Licht, das sich von einem Gravitationszentrum entfernt. Bei der **gravitativen Blauverschiebung** oder **Gravitations-Blauverschiebung** handelt es sich um den umgekehrten Effekt einer Wellenlängenverkürzung für einfallendes Licht, also für Licht, das sich auf ein Gravitationszentrum zubewegt.

> „Photons climbing out of a gravitating object become less energetic. This loss of energy is known as a "redshifting", as photons in the visible spectrum would appear more red. Similarly, photons falling into a gravitational field become more energetic and exhibit a blueshifting. […] Note that the magnitude of the redshifting (blueshifting) effect is not a function of the emitted angle or the received angle of the photon – it depends only on how far radially the photon had to climb out of (fall into) the potential well."
>
> „Photonen, die von einer gravitierenden Masse aufsteigen, werden energieärmer. Dieser Energieverlust ist als „Rotverschiebung" bekannt, da Photonen im sichtbaren Spektrum mehr rot erscheinen würden. In ähnlicher Weise werden Photonen, die in einem Gravitationsfeld fallen, energiereicher und zeigen eine Blauverschiebung. […] Dabei ist zu beachten, dass die Größe des Effektes der Rotverschiebung (Blauverschiebung) keine Funktion des Abstrahl- oder Empfangswinkels des Photons ist – sie hängt nur davon ab, wieweit das Photon im Potentialfeld radial aufgestiegen (gefallen) ist."
>
> – R. J. Nemiroff: *Gravitational Principles and Mathematics.*[1]

Die *gravitative Rotverschiebung* ist eine direkte Folge der gravitativen Zeitdilatation. Sie ist streng genommen kein Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie, sondern folgt bereits aus der speziellen Relativitätstheorie und dem Äquivalenzprinzip der allgemeinen Relativitätstheorie. Licht, das von einer Lichtquelle mit einer gegebenen Frequenz nach oben (also vom Gravitationszentrum weg) ausgestrahlt wird, wird dort mit einer geringeren Frequenz gemessen. Das bedeutet also insbesondere, dass bei einem Lichtsignal mit einer bestimmten Anzahl von Schwingungen der zeitliche Abstand zwischen dem Beginn und dem Ende des Signals beim Empfänger größer ist als beim Sender. Dies wird durch die gravitative Zeitdilatation verständlich.

Aufgrund der gravitativen Zeitdilatation ist das Zeitintervall zwischen Anfang und Ende der Lichtwelle umso länger, je weiter nach oben man sich im Gravitationsfeld bewegt, weil die Zeit zunehmend schneller verstreicht. Das bedeutet, dass die Welle bei ihrer Bewegung nach oben immer länger gemessen wird. Daher muss auch der Abstand zwischen den einzelnen Wellenbergen immer mehr wachsen, sodass das Licht immer langwelliger, also energieärmer erscheint.

Die gravitative Rotverschiebung wurde von Einstein bereits 1911 vor Fertigstellung der allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagt und kann bereits aus der Energieerhaltung hergeleitet werden, sodass ihre experimentelle Bestätigung zwar notwendige Voraussetzung für die Gültigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie ist, aber andererseits nicht sehr große Aussagekraft hat. Von W. S. Adams wurde 1925 die Rotverschiebung am Weißen Zwerg Sirius B nachgewiesen. Die Messung der gravitativen Rotverschiebung an Weißen Zwergen ist aber schwierig von der Rotverschiebung durch die Eigenbewegung zu unterscheiden, und die Genauigkeit ist begrenzt. Robert Pound und Glen Rebka wiesen 1960 mit Hilfe des Mößbauer-Effektes die gravitative Rotverschiebung der Strahlung einer Gammaquelle im Erdgravitationsfeld bei einem Höhenunterschied von nur 25 m mit ausreichender Genauigkeit nach (Pound-Rebka-Experiment). Spätere Verbesserungen (Pound-Rebka-Snider-Experiment) erreichten eine Genauigkeit von etwa 1,5 %. Die gravitative Rotverschiebung wurde mittels Raumsonden auch für die Sonne und den Saturn nachgewiesen. Der geplante Satellit OPTIS soll, neben anderen Tests zur speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie, die gravitative Rotverschiebung mit einer Genauigkeit von 10^{-5} testen. 2018 wurde die gravitative Rotverschiebung beim Stern S2 bei dessen größter Annäherung an das Schwarze Loch in Sagittarius A im Zentrum der Milchstraße nachgewiesen.[2]



Gravitative Rotverschiebung einer Lichtwelle

Die Entwicklung von Atomuhren hat es möglich gemacht, den Einfluss der Gravitation auf die Zeit auch direkt zu messen. Im Prinzip ist diese Messung eine Variation der Nachweise der gravitativen Rotverschiebung. 1971 wurde durch Josef Hafele und Richard Keating (Hafele-Keating-Experiment) mit Caesiumuhren in Flugzeugen der durch die Gravitation verursachte Gangunterschied von Uhren in verschiedenen Höhen gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie mit etwa 10 % Genauigkeit eindeutig nachgewiesen. Durch ein ähnliches Experiment von C. Alley (Maryland-Experiment) konnte die Genauigkeit 1976 auf 1 % gesteigert werden. Robert Vessot und Martin Levine publizierten 1979 Ergebnisse eines ähnlichen Experiments mit Hilfe von Raketen und gaben eine Genauigkeit von 0,02 % an. Beim heutigen satellitengestützten GPS-Navigationssystem müssen Korrekturen sowohl gemäß der speziellen als auch der allgemeinen Relativitätstheorie berücksichtigt werden, wobei Effekte durch die allgemeine Relativitätstheorie überwiegen. Umgekehrt kann dies auch als Bestätigung dieser Theorien angesehen werden.

Gravitative Rotverschiebung verschiedener Himmelsobjekte für einen Beobachter im Unendlichen

Planet/Stern	Rotverschiebung
Erde	$7{,}0 \cdot 10^{-10}$
Jupiter	$2{,}0 \cdot 10^{-8}$
Mira	$6{,}4 \cdot 10^{-9}$
Beteigeuze	$4{,}3 \cdot 10^{-8}$
Pollux	$4{,}3 \cdot 10^{-7}$
Sonne	$2{,}1 \cdot 10^{-6}$

Stern	Rotverschiebung
Naos	$6{,}2 \cdot 10^{-6}$
Sirius B	$2{,}4 \cdot 10^{-4}$
BPM 37093	$8{,}0 \cdot 10^{-4}$
Neutronenstern mit 1,4 $M_\odot$	0,24
Neutronenstern mit 1,8 $M_\odot$	0,34
Schwarzes Loch, Ereignishorizont	unendlich

Bei starken Gravitationsfeldern, wie sie beispielsweise von Neutronensternen erzeugt werden, gilt für z

$$z = \left(1 - \frac{2GM}{r_0 c^2}\right)^{-1/2} - 1 = \left(1 - \frac{r_S}{r_0}\right)^{-1/2} - 1$$

mit der Gravitationskonstanten G, der Masse des Objekts M, der Lichtgeschwindigkeit c und dem Schwarzschildradius $r_\mathrm{s} = \frac{2GM}{c^2}$. Das Licht wird im Abstand r_0 vom Zentrum des Objekts ausgesandt.

Für die Beispiele von Neutronensternen mit dem jeweils gleichen Radius r_0 = 12 km ergeben sich die Tabellenwerte von $z = 0{,}24$ für den masseärmeren und $z = 0{,}34$ für den massereicheren Neutronenstern.

Entwickelt man die Formel für die Rotverschiebung in eine Reihe

$$z \simeq \frac{GM}{r_0 c^2} + \frac{3}{2}\left(\frac{GM}{r_0 c^2}\right)^2 + \frac{5}{2}\left(\frac{GM}{r_0 c^2}\right)^3 + \dots$$

dann erhält man für schwache Gravitationsfelder (kleine Massen oder große Radien) die Näherungsformel:

$$z = \frac{GM}{r_0 c^2}$$

Für das Beispiel Erde und $r_0 = 6378$ km ergibt sich der Tabellenwert von $z = 7{,}0 \cdot 10^{-10}$.

Ein Beobachter, der sich relativ zum Schwerpunkt einer nichtrotierenden Masse auf der radialen Koordinate r_1 befindet, erhält ein Signal, das von einem sich auf r_2 befindlichen Beobachter gesendet wird, um den Faktor

$$\frac{f_\mathrm{empfangen}}{f_\mathrm{gesendet}} = \frac{\lambda_\mathrm{gesendet}}{\lambda_\mathrm{empfangen}} = \sqrt{\frac{1 - r_\mathrm{s}/r_2}{1 - r_\mathrm{s}/r_1}} = \frac{1}{1+z}$$

rot- bzw. blauverschoben. Die r-Koordinate ist in Schwarzschild-Koordinaten gegeben, mit dem Schwarzschildradius $r_\mathrm{s} = \frac{2GM}{c^2}$.

Gravitative Rot- und Blauverschiebung in der speziellen Relativitätstheorie

Die Formel für die Rotverschiebung in schwachen Gravitationsfeldern lässt sich[3] folgendermaßen im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie herleiten.

Dazu betrachtet man die Änderung der Energie E eines Teilchens der Masse m und der Geschwindigkeit $\vec{v}$ im Gravitationsfeld $\vec{g}$:

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = m\vec{g} \cdot \vec{v} = \vec{g} \cdot \vec{p}.$$

Für ein masseloses Photon mit Energie $E = \hbar\omega$ und Impuls $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ ergibt sich nach Division durch das Plancksche Wirkungsquantum $\hbar$:

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \vec{g} \cdot \vec{k}$$

Das Gravitationsfeld ist außerhalb eines schweren Himmelskörpers der Masse M im Abstand $\vec{r}$ von seinem Schwerpunkt

$$\vec{g} = -GM\frac{\vec{r}}{r^3}.$$

Wenn sich das Photon in radialer Richtung vom Himmelskörper wegbewegt, dann ist sein Wellenzahlvektor

$$\vec{k} = \frac{\omega}{c}\frac{\vec{r}}{r},$$

womit die Energiegleichung die Form

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = -\frac{GM}{c}\frac{\omega}{r^2}$$

bekommt. Mit $\mathrm{d}r = c\,\mathrm{d}t$ kann die Differentialgleichung in eine gewöhnliche, nur vom Abstand abhängige Gleichung transformiert und analytisch gelöst werden:

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}r} = -\frac{GM}{c^2}\frac{\omega}{r^2} \quad \Rightarrow \quad \omega(r) = \omega_0 \exp\left(-\frac{GM}{c^2}\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r}\right)\right)$$

In unendlicher Entfernung vom Himmelskörper $r \to \infty$ nimmt ein Beobachter die Kreisfrequenz

$$\omega_{\mathrm{obs}} = \omega_0 \exp\left(-\frac{GM}{c^2}\left(\frac{1}{r_0}\right)\right) \simeq \omega_0 \left(1 - \frac{GM}{r_0 c^2} + \frac{1}{2}\frac{G^2M^2}{r_0^2c^4} - \ldots\right)$$

wahr. Somit wird die Rotverschiebung:

$$z = \frac{\omega_0 - \omega_{\mathrm{obs}}}{\omega_{\mathrm{obs}}} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{GM}{r_0c^2}\right)}{\exp\left(-\frac{GM}{r_0c^2}\right)} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{r_S}{2r_0}\right)}{\exp\left(-\frac{r_S}{2r_0}\right)}$$

Sie wird in der linearen Näherung

$$z = \frac{\frac{GM}{r_0c^2} - \frac{1}{2}\frac{G^2M^2}{r_0^2c^4} + \ldots}{1 - \frac{GM}{r_0c^2} + \frac{1}{2}\frac{G^2M^2}{r_0^2c^4} - \ldots} \simeq \frac{\frac{GM}{r_0c^2}}{1 - \frac{GM}{r_0c^2} + \frac{1}{2}\frac{G^2M^2}{r_0^2c^4} - \ldots} \simeq \frac{GM}{c^2r_0}$$

zu dem, was die allgemeine Relativitätstheorie für schwache Gravitationsfelder prognostiziert.

Kosmologische Rotverschiebung

Die Expansion des Universums darf nicht so verstanden werden, dass sich Galaxien in der Raumzeit voneinander entfernen (Relativbewegung). Es ist der Raum selbst, der sich ausdehnt, die Galaxien werden *mitbewegt.* Gravitativ gebundene Objekte wie Galaxien oder Galaxienhaufen expandieren nicht, denn sie sind durch ihre Eigengravitation von der allgemeinen Expansionsbewegung (beschrieben durch die Friedmann-Gleichungen) entkoppelt. Dies gilt insbesondere auch für Objekte, die sich innerhalb solcher gravitativ gebundener Systeme befinden (Sterne, Planeten) sowie für elektromagnetisch gebundene Systeme wie Atome und Moleküle. Einer elektromagnetischen Welle hingegen, die sich frei durch eine sich ausdehnende Raumzeit ausbreitet, wird die Expansionsbewegung direkt aufgeprägt: Vergrößert sich die Raumzeit während der Laufzeit um einen Faktor n, so geschieht dies auch mit der Wellenlänge des Lichtes.

Diese *kosmologische Rotverschiebung* ist grundsätzlich von der Rotverschiebung durch den Dopplereffekt zu unterscheiden, die nur von der relativen Geschwindigkeit der Galaxien bei der Emission und der Absorption abhängt. Die aus der kosmologischen Rotverschiebung abgeleiteten Fluchtgeschwindigkeiten ferner Galaxien sind demnach direkt auf die Ausdehnung der Raumzeit zurückzuführen (**Rezessionsgeschwindigkeit**). Bereits ab Entfernungen von wenigen 100 Megaparsec ist der Anteil des Dopplereffekts verschwindend gering. Ferner ergibt sich aus der allgemeinen Relativitätstheorie, dass die beobachteten Fluchtgeschwindigkeiten keine relativistischen Zeiteffekte hervorrufen, wie sie von der speziellen Relativitätstheorie für Bewegungen im Raum beschrieben werden. Eine *kosmologische Zeitdilatation* findet dennoch statt, da die später ausgesandten Photonen eines Objektes aufgrund der Expansion eine größere Wegstrecke zurücklegen müssen. Physikalische Prozesse erscheinen daher bei rotverschobenen Objekten (aus unserer Sicht) zunehmend verlangsamt abzulaufen.

Rotverschiebung, Blauverschiebung und Kosmologie

Das Licht von Galaxien ist in den allermeisten Fällen rotverschoben (bereits unter den nächstgelegenen 1000 sind es etwa 75 Prozent). Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto stärker ist im Mittel die Rotverschiebung. Nur wenige relativ nahe Galaxien zeigen aufgrund zusätzlicher „eigener“ Bewegung (Pekuliargeschwindigkeit) relativ zur Erde *auf uns zu* insgesamt eine *Blauverschiebung*. Ein Beispiel dafür ist der Andromedanebel.

Vesto Slipher führte ab 1912 spektroskopische Beobachtungen von Galaxien durch und bestimmte deren Radialgeschwindigkeiten aus den Linienverschiebungen. Er erkannte bald, dass die meisten der von ihm beobachteten Galaxien eine Rotverschiebung aufwiesen.[4] 1929 entdeckte Edwin Hubble den Zusammenhang von Rotverschiebung und Entfernung der Galaxie. Zunächst wurde der Effekt als Dopplereffekt interpretiert, bald aber auf die Expansion des Raumes zurückgeführt. Die kosmologische Rotverschiebung nimmt mit der Galaxienentfernung gemäß der Hubble-Konstante zu, weshalb man die Entfernungen durch Messung der Rotverschiebung abschätzen kann.

Je höher die Rotverschiebung eines astronomischen Objekts, desto länger war das von ihm ausgesandte Licht unterwegs und desto weiter zurück in der Vergangenheit sehen wir es. Aus der Rotverschiebung kann auch die Entfernung des Objekts bestimmt werden, allerdings ist diese in einer sich ausdehnenden Raumzeit nicht mehr eindeutig definiert. Es gibt verschiedene Entfernungsmaße, die sich aus der Rotverschiebung ableiten lassen. In der Kosmologie werden Betrachtungen und Rechnungen deshalb immer im Rotverschiebungsraum angestellt.

Im Oktober 2010 haben Astronomen mit Hilfe des Very Large Telescope nachweisen können, dass das Licht der zuvor mit dem Hubble-Weltraumteleskop entdeckten Galaxie *UDFy-38135539* 13,1 Milliarden Jahre zu uns unterwegs war. Mit dem damaligen Rotverschiebungsrekord von $z = 8{,}6$ erreichte uns erstmals beobachtetes Licht, das nur 700 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesandt wurde; die Galaxie entstand damit in einer Zeit, in der das Universum noch nicht vollständig transparent und um den Faktor 9,6 kleiner war.[5][6]

Mit der Entdeckung der Galaxie *UDFj-39546284* in der Hubble-Ultra-Deep-Field-09-Aufnahme (HUDF09) konnte eine kosmologische Rotverschiebung von $z = 10{,}3$ ermittelt werden. Der bis dahin beobachtete Altersrekord verschob sich damit auf 480 Millionen Jahre danach. Die neu entdeckte Galaxie mit ihrem Alter von 13,2 Milliarden Jahren würde bei einer Bestätigung der Rotverschiebung einen wichtigen Beobachtungsbaustein zur Entwicklung der ersten Galaxien nach dem Urknall liefern.[7][8]

Im Juli 2022 wurde vom James-Webb-Weltraumteleskop im Rahmen des Beobachtungsprogramms *Grism Lens-Amplified Survey from Space* die Galaxie **GLASS-z12** (auch kurz *GL-z12*), vormals **GLASS-z13**, aufgefunden.[9] Sie ist derzeit eine der ältesten jemals entdeckten Galaxien, die nur 300 bis 400 Millionen

Jahre nach dem Urknall entstanden, also etwa 13,4 Milliarden Jahre alt ist. Sie hat eine Rotverschiebung von etwa z = 12,4.[10] Sie wurde zusammen mit einer anderen Galaxie, GLASS-z11, entdeckt, die mit GN-z11 vergleichbar ist, ebenfalls eine der ältesten entdeckten Galaxien.[11] Am 25. Oktober 2022 wurden die Messergebnisse der Erstveröffentlichung korrigiert, und da sich statt z≈13 ein Wert von z≈12 ergab, wurde die Galaxie in GLASS-z12 umbenannt.

Der Sachs-Wolfe-Effekt erklärt Fluktuationen der Rotverschiebung der Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Relativistische Herleitung

Man betrachte ein Photon, emittiert von einer Galaxie mit mitbewegter Entfernung w (siehe auch die relativistische Herleitung der Friedmann-Gleichungen), und absorbiert vom Beobachter bei $w = 0$. Sowohl die Galaxie als auch der Beobachter folgen der kosmischen Expansion. Orientiert man das beschreibende Koordinatensystem so, dass das Photon entlang dessen polarer Achse läuft, dann lautet das Linienelement des Photons:

$$\mathrm{d}s^2 = 0 = -c^2\,\mathrm{d}t^2 + a^2(t)\,\mathrm{d}w^2,$$

wobei

- c die Lichtgeschwindigkeit darstellt,
- $a(t)$ den Skalenfaktor und
- w die mitbewegte Radialkoordinate.

Zwei aufeinanderfolgende Maxima der Lichtwelle werden zu den kosmologischen Zeiten t_{e1} und t_{e2} ausgesandt sowie zu den Zeiten t_{a1} und t_{a2} wieder absorbiert. Die Wellenlängen des Photons zu Zeiten der Emission und Absorption sind dann:

$$\lambda_e = c\,(t_{\mathrm{e2}} - t_{\mathrm{e1}})$$
$$\lambda_a = c\,(t_{\mathrm{a2}} - t_{\mathrm{a1}})$$

Die mitbewegte Entfernung, die von beiden Maxima zurückgelegt wird, ist per definitionem gleich groß. Integriert man das Linienelement des Photons, so erhält man:

$$0 = \int_{t_{\mathrm{e2}}}^{t_{\mathrm{a2}}} a^{-1}(t)\,\mathrm{d}t \; - \int_{t_{\mathrm{e1}}}^{t_{\mathrm{a1}}} a^{-1}(t)\,\mathrm{d}t$$

Durch Vertauschen der Integrationsgrenzen ergibt sich dann für infinitesimal kleine Intervalle zwischen Emission (Absorption) der beiden Maxima:

$$0 = \int_{t_{\mathrm{a1}}}^{t_{\mathrm{a2}}} a^{-1}(t)\,\mathrm{d}t \; - \int_{t_{\mathrm{e1}}}^{t_{\mathrm{e2}}} a^{-1}(t)\,\mathrm{d}t = \frac{t_{\mathrm{a2}} - t_{\mathrm{a1}}}{a(t_{\mathrm{a1}})} - \frac{t_{\mathrm{e2}} - t_{\mathrm{e1}}}{a(t_{\mathrm{e1}})}$$

Unter Verwendung der emittierten und absorbierten Wellenlängen wie sie oben angegeben sind, kann man deren Verhältnis ableiten:

$$\frac{\lambda_{\mathrm{a}}}{\lambda_{\mathrm{e}}} = \frac{t_{\mathrm{a2}} - t_{\mathrm{a1}}}{t_{\mathrm{e2}} - t_{\mathrm{e1}}} = \frac{a(t_{\mathrm{a1}})}{a(t_{\mathrm{e1}})}$$

Schließlich definiert man dann folgendermaßen die *kosmologische Rotverschiebung:*

$$z := \frac{\lambda_\mathrm{a} - \lambda_\mathrm{e}}{\lambda_\mathrm{e}} = \frac{a(t_\mathrm{a})}{a(t_\mathrm{e})} - 1$$

Da für die meisten Zwecke der Absorptionszeitpunkt t_a mit der heutigen Zeit $t = t_0$ zusammenfällt und $a(t_0) = 1$ gilt, ergibt sich vereinfacht:

$$z = \frac{1}{a(t)} - 1$$

Umgekehrt ergibt sich hieraus unmittelbar der Skalenfaktor des Universums zum Emissionszeitpunkt im Vergleich zum heutigen Wert:

$$a = \frac{1}{1+z}$$

Beobachtet man beispielsweise eine Galaxie mit Rotverschiebung $z = 3$, so hatte das Universum zum Zeitpunkt der Aussendung des von uns empfangenen Lichts nur ein Viertel seiner Größe. Sämtliche physikalischen Prozesse in dieser Galaxie laufen aus der Sicht des Beobachters um einen Faktor $1 + z = 4$ verlangsamt ab, da sich der Abstand zweier nacheinander emittierter Photonen und damit auch deren Eintreffen beim Beobachter *(kosmologische Zeitdilatation)* entsprechend vergrößert. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die zunehmende Streckung der Lichtkurven von Supernovae vom Typ Ia, deren Zustandekommen gut verstanden ist, mit wachsender Rotverschiebung.

Messmethoden

In der Astronomie wird die Rotverschiebung durch Methoden der Spektralanalyse gemessen; sie sind heute durch digitale statt fotografischer Erfassung wesentlich genauer geworden. Doch um Spektrallinien gut erfassen zu können, müssen die Galaxien eine gewisse Mindesthelligkeit aufweisen. Rotverschiebungen von Galaxien werden im Rahmen von Durchmusterungen wie dem Sloan Digital Sky Survey regelmäßig neu bestimmt.

Die Gravitative Rotverschiebung konnte mit Hilfe des Mößbauer-Effekts in Laborexperimenten auf der Erde beobachtet werden (siehe Pound-Rebka-Experiment).

Siehe auch

- Bathochromer Effekt

Literatur

- Stuart Clark: *Redshift.* Univ. of Hertfordshire Press, Hatfield 1997, ISBN 0-900458-79-8.
- George B. Field: *The redshift controversy.* Addison-Wesley, Redwood 1973, ISBN 0-8053-2512-3.
- Rainer Kayser: *Licht und Asche des Urknalls.* (https://web.archive.org/web/20100916050712/http://www.mpia-hd.mpg.de/suw/suw/SuW/BR-alpha/AC006%20-%20Universum/AC006-1

14.html) (Memento vom 16. September 2010 im *Internet Archive*). In: *Sterne und Weltraum.* Special 2 – *Schöpfung ohne Ende.* S. 106–117 (online auf *mpia-hd.mpg.de*).

Weblinks

Commons: Rotverschiebung (https://commons.wikimedia.org/wiki/Redshift?uselang=de) – Album mit Bildern, Videos und Audiodateien

Wiktionary: Rotverschiebung – Bedeutungserklärungen, Wortherkunft, Synonyme, Übersetzungen

Einzelnachweise

1. R. J. Nemiroff: *II. Gravitational Principles and Mathematics.* (https://apod.nasa.gov/htmltest/gifcity/nslens_math.html) In: *Distortions Paper Principles and Mathematics.* Abgerufen am 29. Dezember 2020.
   Siehe auch Robert J. Nemiroff: *Visual distortions near a neutron star and black hole*. In: *American Journal of Physics*. Band 61, Nr. 7, 1. Juli 1993, S. 619–632, doi:10.1119/1.17224 (https://doi.org/10.1119/1.17224).
2. Gravity Collaboration (R. Abuter u. a.): *Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole. (https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2018/07/aa33718-18/aa33718-18.html)* In: *Astronomy & Astrophysics.* Band 615, 2018, L 15, DOI:10.1051/0004-6361/201833718.
3. A. Malcherek: *Elektromagnetismus und Gravitation. Die Vereinheitlichung der klassischen Physik.* Springer-Vieweg, 2022, doi:10.1007/978-3-658-35956-0 (https://doi.org/10.1007/978-3-658-35956-0).
4. V. M. Slipher: *Spectrographic Observations of Nebulae. (https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1915PA.....23...21S)* In: *Popular Astronomy.* In: *Vol. 23.* 1915, S. 21–24.
5. *Forscher schauen ans Ende des Universums. (https://www.stern.de/panorama/wissen/kosmos/galaxie-udfy-38135539-forscher-schauen-ans-ende-des-universums-3527510.html)* Bei: *stern.de.* 20. Oktober 2010.
6. M. D. Lehnert u. a.: *Spectroscopic confirmation of a galaxy at redshift z = 8.6.* (https://www.nature.com/articles/nature09462) In: *Nature.com.* 467, 2010, S. 940–942.
7. *NASA's Hubble Finds Most Distant Galaxy Candidate Ever Seen in Universe.* (https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/farthest-galaxy.html) Auf: *NASA Hubble Mission Page.* 26. Januar 2011.
8. R. J. Bouwens u. a.: *A candidate redshift z ≈ 10 galaxy and rapid changes in that population at an age of 500 Myr.* (https://www.nature.com/articles/nature09717) In: *Nature.com.* 469, 2011, S. 504–507.
   R. J. Bouwens u. a.: *Searches and limits for z ≈ 10 galaxies in the HST HUDF09 Data.* (https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fnature09717/MediaObjects/41586_2011_BFnature09717_MOESM310_ESM.pdf) In: *Nature.com. Supplementary Information for Nature Letter.* (PDF; 731 kB).
9. *»James Webb«-Teleskop entdeckt früheste bekannte Galaxie*. In: *Der Spiegel*. 21. Juli 2022, ISSN 2195-1349 (https://zdb-katalog.de/list.xhtml?t=iss%3D%222195-1349%22&key=cql) (spiegel.de (https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/james-webb-teleskop-entdeckt-fruheste-bekannte-galaxie-a-588e16bd-aa08-435c-9413-6fc3426f0835) [abgerufen am 21. Juli 2022]).
10. Rohan P. Naidu et al.: *Two Remarkably Luminous Galaxy Candidates at z ≃ 10 – 12 Revealed by JWST*. arxiv:2207.09434 (https://arxiv.org/abs/2207.09434).
11. Jaron Schneider: *James Webb Telescope Breaks Record for Oldest Galaxy Ever Observed.* (https://petapixel.com/2022/07/20/james-webb-telescope-breaks-record-for-oldest-galaxy-ever-observed/) 20. Juli 2022, abgerufen am 21. Juli 2022 (englisch).

Abgerufen von „https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Rotverschiebung&oldid=241331176“

Diese Seite wurde zuletzt am 19. Januar 2024 um 14:16 Uhr bearbeitet.

Der Text ist unter der Lizenz „Creative-Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen“ verfügbar; Informationen zu den Urhebern und zum Lizenzstatus eingebundener Mediendateien (etwa Bilder oder Videos) können im Regelfall durch Anklicken dieser abgerufen werden. Möglicherweise unterliegen die Inhalte jeweils zusätzlichen Bedingungen. Durch die Nutzung dieser Website erklären Sie sich mit den Nutzungsbedingungen und der Datenschutzrichtlinie einverstanden.
Wikipedia® ist eine eingetragene Marke der Wikimedia Foundation Inc.